دانشکده فنی مهندسی مکانیک

**پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)**

## عنوان

# بررسی تأثیر پدیده‌های غیرخطی اتصالات در تحلیل سینماتیکی و دینامیکی مکانیزم‌ها

**استاد راهنما**

دکتر موسی رضائی

**استاد مشاور**

دکتر مرتضی همایون صادقی

**پژوهشگر**

حسام الدین ارغند

**شهریور ۱۳۹۰**

تقدیم به

پدر، مادر و خواهر عزیزم

و

آنانکه تاریخ را مبهوت عظمت انسان نمودند

# تشکر و قدردانی

شکر و سپاس خداوند بلند مرتبه و بزرگ را که نعمت زندگی را بر من بخشید و در لحظه‌لحظه‌ی آن یاری رسانم است. سپاس او را که بار دیگر به فضل و لطف بی‌دریغش مرحله‌ای حساس از زندگی را با کوله‌باری از آموخته‌ها و تجربه پشت سر می‌گذارم و با امید به فردایی روشن که او پشتیبانم خواهد بود، به سویش گام می‌نهم.

و با تشکر از لطف و زحمات خانواده‌ام، به پاس پشتیبانی همیشگی پدرم و دعای پاک مادرم و محبت سرشار خواهرم، که خیرخواهم بوده و هستند. باشد که مایه‌ی سربلندی و افتخارشان باشم، و در راه آرمانهای دینم و خدمت به وطنم قدم بردارم!

و با تشکر از همه اساتید و معلمانم که امروزم را مدیون تلاش‌ها و زحمات یک‌یکشان هستم و دعای خیرشان پشتیبان راهم بوده و هست. و با سپاس از زحمات بی‌دریغ استاد گرامی‌ام جناب دکتر رضائی، که در راه به ثمر رسیدن این پایان‌نامه از هیچ کمکی فروگذار نکردند. و با سپاس از زحمات استاد ارجمند جناب دکتر صادقی که در این سالها بسیار از ایشان آموختم.

و سپاس از دوستانم که در مراحل مختلف، در کنارم بودند و تمام کسانی که مرا در شناخت مسیر حقیقت یاری رسان بودند. و در پایان از خداوند می‌خواهم که قدمم را در راه رسیدن به هدف زندگیم استوار بدارد تا به حق قدردان تمام این زحمات باشم!

حسام الدّین ارغند

شهریور ۱۳۹۰

**نام خانوادگی:** ارغند **نام:** حسام الدین

**عنوان پایان نامه:** تأثیر پدیده‌های غیرخطی اتصالات در تحلیل سینماتیکی و دینامیکی مکانیزم‌ها

**استاد راهنما:** دکتر موسی رضائی

**استاد مشاور:** دکتر مرتضی همایون صادقی

**مقطع تحصیلی:** کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** طراحی کاربردی **دانشگاه:** تبریز

**دانشکده:** فنی مهندسی مکانیک **تاریخ فارغ التحصیلی:** ۹۰/۶/۱۳ **تعداد صفحه:** ۷۵

**کلید واژه:** مکانیزم، مفصل غیرایده‌آل، لقی، اصطکاک، استهلاک، روغنکاری

**چکیده:**

در این پایان‌نامه روش تحلیل دینامیکی مکانیزم‌ها با در نظر گرفتن مفصل غیرایده‌آل معرفی شده است. پدیده‌های مربوط به مفصل غیرایده‌آل شامل لقی، اصطکاک، استهلاک سازه‌ای و روغنکاری مورد بررسی قرار گرفته است. با وجود اینکه در نظر گرفتن لقی در مفصل‌های مکانیزم‌ها جهت تأمین امکان حرکت نسبی اجزای مکانیزم اجتناب‌ناپذیر است ولی وجود لقی یکی از مهمترین عوامل ایجاد ارتعاشات و نویز در سیستم‌های مکانیکی محسوب می‌شود. برای مدل کردن نیروی الاستیک در مفصل غیرایده‌آل، مدلی بر پایه‌ی تئوری بستر الاستیک وینکلر که می‌تواند در گستره‌ی وسیعی از لقی مفصل لولایی، رابطه‌ی مناسبی بین نیروی الاستیک و عمق نفوذ بیان کند، استفاده شده است. همچنین مدل‌های مناسبی برای توصیف نیروی اصطکاک خشک و اثر فشردگی فیلم روغن در مفصل لولایی روغنکاری شده به کار برده شده است و یک مدل خطی برای نیروی استهلاک سازه‌ای در برخورد اجزای مفصل لولایی غیرایده‌آل ارائه شده است.

نتایج تحلیل‌ها برای مکانیزم لنگ- لغزنده با در نظر گرفتن مفصل لولایی غیرایده‌آل در اتصال بین شاتون و لغزنده ارائه شده است. معادلات حرکت بر اساس قوانین نیوتن- اویلر استخراج شده است و به کمک روش‌های عددی مناسب حل شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن نیروی استهلاک و روغنکاری سبب می‌شود که رفتار مکانیزم به رفتار مکانیزم مشابه با مفصل ایده‌آل نزدیک‌تر شود.

# فهرست مطالب


فصل اول: مقدمه و پیشینه پژوهش ..... ۱

۱-۱- مقدمه ..... ۱

۱-۲- پیشینه پژوهش ..... ۳

۱-۳- هدف از پژوهش حاضر ..... ۸

فصل دوم: پایه‌های نظری ..... ۹

۲-۱- مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی چند عضوی ..... ۹

۲-۱-۱-معادلات قید ..... ۱۱

۲-۱-۲-مدل‌سازی هندسی و دینامیکی ..... ۱۴

۲-۲- مدلسازی نیروهای تماسی- برخوردی ..... ۱۹

۲-۲-۱- مدل‌سازی نیروهای عمودی ..... ۲۱

۲-۲-۲- مدل‌سازی نیروی استهلاک ..... ۳۱

۲-۲-۳- مدلسازی نیروهای مماسی ..... ۳۳

۲-۲-۴- مدل‌سازی نیروهای هیدرودینامیکی ..... ۳۶

فصل سوم: تحلیل‌ها و نتایج ..... ۴۲

۳-۱- معرفی مدل مکانیزم لنگ- لغزنده ..... ۴۲

۳-۲- نتایج بدست آمده از حل مکانیزم لنگ- لغزنده با اتصالات ایده‌آل ..... ۴۳

۳-۳- روش حل مکانیزم دارای مفصل غیرایده‌آل ..... ۴۵

۳-۳-۱- اعمال مدل پیشنهاد شده توسط *Liu* و همکاران [۱۸] بر مفصل غیرایده‌آل ..... ۵۱

۳-۳-۲- اعمال نیروی اصطکاک ..... ۵۶
۳-۳-۳- استهلاک سازه‌ای در برخورد یاتاقان و ژورنال ..... ۵۹
۳-۳-۵- اعمال اثر روغنکاری در مفصل ایده‌آل ..... ۶۴
فصل چهارم: بحث و نتیجه‌گیری ..... ۶۷
۴-۱- نتیجه‌گیری ..... ۶۷
۴-۲- پیشنهادات برای کارهای آینده ..... ۷۰
پیوست: حل دینامیکی مکانیزم لنگ- لغزنده با مفصل ایده‌آل ..... ۷۱
مراجع ..... ۷۴

# فهرست اشکال


شکل ۲-۱ مدل شماتیک کلی از یک مکانیزم چند عضوی با انواع اتصالات [۱۵].....۹

شکل ۲-۲ مفصل لولایی صفحه‌ای بین جسم $i$ و $j$ [۳] .....۱۱

شکل ۲-۳ اتصال کشویی بین دو عضو $i$ و $j$ [۳] .....۱۳

شکل ۲-۴ مدل شماتیک یاتاقان و ژورنال دارای لقی [۲۹] .....۱۸

شکل ۲-۵ مدل شماتیک یاتاقان و ژورنال دارای لقی [۲۸] الف) در فاز حرکت آزاد ب) در فاز تماس .....۱۸

شکل ۲-۶ مدل تعامل بین دو جسم الاستیک در فرآیند برخورد [۱۵] .....۲۱

شکل ۲-۷ تغییر شکل دو کره با شعاع‌های متفاوت در بارگذاری محوری [۱۵] .....۲۲

شکل ۲-۸ مدل هرتز برای برخورد دو کره [۱۵]: الف) منحنی تغییرات عمق نفوذ در برابر زمان ب) منحنی تغییرات نیرو در برابر زمان ج) منحنی تغییرات نیرو در برابر عمق نفوذ.....۲۳

شکل ۲-۹ مدل کلوین- وویت برای برخورد دو کره [۱۵]: الف) منحنی تغییرات عمق نفوذ در برابر زمان ب) منحنی تغییرات نیرو در برابر زمان ج) منحنی تغییرات نیرو در برابر عمق نفوذ.....۲۴

شکل ۲-۱۰ مدل *Lankarani-Nikravesh* برای برخورد دو کره [۱۵]: الف) منحنی تغییرات عمق نفوذ در برابر زمان ب) منحنی تغییرات نیرو در برابر زمان ج) منحنی تغییرات نیرو در برابر عمق نفوذ.....۲۶

شکل ۲-۱۱ مدل هندسی تماس بین دو استوانه .....۲۶

شکل ۲-۱۲ مدل هندسی مفصل لولایی دارای لقی $c$ [۱۵] .....۲۷

شکل ۲-۱۳ مدل *Dubowsky* برای برخورد دو کره [۱۵]: الف) منحنی تغییرات عمق نفوذ در برابر زمان ب) منحنی تغییرات نیرو در برابر زمان ج) منحنی تغییرات نیرو در برابر عمق نفوذ .....۲۸

شکل ۲-۱۴ مقایسه نتایج سه مدل هرتز، پرسون و *Liu* برای مدل‌سازی رابطه بین نیرو و عمق نفوذ در یاتاقان به قطر $cm$ ۱۰ با نتایج بدست آمده از *FEM* بازای چهار لقی مختلف[۱۸]: الف) $c=$ ۱ $mm$ ب) $c=$ ۰/۵ $mm$ ج) $c=$ ۰/۲ $mm$ د) $c=$ ۰/۱ $mm$.....۳۰

شکل ۲-۱۵ مدل توزیع نیروی استهلاک در سطح تماس ژورنال با یاتاقان در تماس خشک.....۳۲

شکل ۲-۱۶ مدل‌های مختلف نیروی اصطکاک بین دو جسم در تماس با هم [۱۵]: الف) مدل *Dubowsky* ب) مدل *Rooney* و *Deravi* ج) مدل *Threlfall* د) مدل *Ambrosio* .....۳۶

شکل ۲-۱۷ مدل شماتیک توزیع فشار در یاتاقان [۲۹]: الف) در جهت محوری ب) در جهت زاویه‌ای .....۳۷

شکل ۲-۱۸ مقطع عرضی وسط یاتاقان و ژورنال در حال دوران و بارگذاری شده [۱۵] ..... ۳۷

شکل ۳-۱ مکانیزم لنگ- لغزنده ایده‌آل ..... ۴۲

شکل ۳-۲ منحنی‌های دینامیکی برای مکانیزم لنگ- لغزنده در یک سیکل کامل با دور ثابت میل‌لنگ $RPM$ ۵۰۰۰
الف) منحنی تغییرات شتاب خطی لغزنده نسبت به زمان ب) منحنی تغییرات سرعت خطی لغزنده نسبت به زمان ج) منحنی تغییرات سرعت لغزنده به موقعیت آن د) منحنی تغییرات گشتاور وارد بر میل-لنگ نسبت به زمان ..... ۴۴

شکل ۳-۳ مکانیزم لنگ- لغزنده با در نظر گرفتن لقی در اتصال گژن‌پین [۱۵] ..... ۴۵

شکل ۳-۴ جایگزین کردن نیروهای عمل و عکس‌العمل در محل اتصال غیرایده‌آل در مکانیزم لنگ- لغزنده برای تبدیل به دو زنجیره سینماتیکی ایده‌آل ..... ۴۶

شکل ۳-۵ ترسیمه آزاد اجزای زنجیره سینماتیکی متشکل از میل‌لنگ و شاتون ..... ۴۷

شکل ۳-۶ منحنی‌های دینامیکی مکانیزم لنگ- لغزنده در یک سیکل کامل و با دور ثابت میل‌لنگ $RPM$ ۵۰۰۰:
(ـــ) با اعمال مدل پیشنهادی الاستیک $Liu$ و همکارانش [۱۸] در مفصل غیرایده‌آل دارای لقی (--) با مفصل ایده‌آل الف) منحنی تغییرات شتاب لغزنده نسبت به زمان ب) منحنی تغییرات سرعت لغزنده نسبت به زمان ج) منحنی تغییرات سرعت نسبت به موقعیت لغزنده د) منحنی تغییرات گشتاور خارجی وارد بر میل‌لنگ ..... ۵۳

شکل ۳-۷ مقایسه منحنی میانگین‌گیری شده از شتاب پیستون در مکانیزم لنگ- لغزنده با مفصل غیرایده‌آل دارای لقی (ـــ) با منحنی مربوط به مکانیزم با مفصل ایده‌آل (--) ..... ۵۵

شکل ۳-۸ الف) مسیر حرکت مرکز ژورنال نسبت به مرکز یاتاقان در دایره‌ای به شعاع لقی $c$=۰/۱ $mm$ در مدل پیشنهاد شده توسط $Liu$ و همکاران [۱۸] ب) منحنی تغییرات عمق نفوذ، $\delta$، نسبت به زمان در یک سیکل کامل ..... ۵۵

شکل ۳-۹ منحنی‌های دینامیکی مکانیزم لنگ- لغزنده در یک سیکل کامل و با دور ثابت میل‌لنگ $RPM$ ۵۰۰۰:
(ـــ) با اعمال مدل پیشنهادی الاستیک $Liu$ و همکارانش [۱۸] و مدل پیشنهادی اصطکاک $Ambrosio$ [۲۶] در مفصل غیرایده‌آل دارای لقی (--) با مفصل ایده‌آل الف) منحنی تغییرات شتاب لغزنده نسبت به زمان ب) منحنی تغییرات سرعت لغزنده نسبت به زمان ج) منحنی تغییرات سرعت نسبت به موقعیت لغزنده د) منحنی تغییرات گشتاور خارجی وارد بر میل‌لنگ ..... ۵۷

شکل ۳-۱۰ الف) مسیر حرکت مرکز ژورنال نسبت به مرکز یاتاقان در دایره‌ای به شعاع لقی $c=۰/۱\ mm$ با در نظر گرفتن نیروی عمودی الاستیک و نیروی مماسی اصطکاک ب) منحنی تغییرات عمق نفوذ، $\delta$، نسبت به زمان در یک سیکل کامل ..... ۵۸

شکل ۳-۱۱ منحنی‌های دینامیکی مکانیزم لنگ- لغزنده در یک سیکل کامل و با دور ثابت میل‌لنگ $RPM$ ۵۰۰۰: (ـــ) با اعمال مدل پیشنهادی الاستیک $Liu$ و همکارانش [۱۸] و استهلاک خطی در مفصل غیرایده‌آل (--) با مفصل ایده‌آل الف) منحنی تغییرات شتاب لغزنده نسبت به زمان ب) منحنی تغییرات سرعت لغزنده نسبت به زمان ج) منحنی تغییرات سرعت نسبت به موقعیت لغزنده د) منحنی تغییرات گشتاور خارجی وارد بر میل‌لنگ ..... ۶۱

شکل ۳-۱۲ الف) مسیر حرکت مرکز ژورنال نسبت به مرکز یاتاقان در دایره‌ای به شعاع لقی $c=۰/۱\ mm$ برای مفصل غیرایده‌آل دارای استهلاک سازه‌ای ب) منحنی تغییرات عمق نفوذ، $\delta$، نسبت به زمان در یک سیکل کامل ..... ۶۲

شکل ۳-۱۳ الف) منحنی تغییرات نیروی الاستیک در مدل مفصل غیرایده‌آل (--) منحنی تغییرات نیروی استهلاک (ـــ) ب) منحنی تغییرات نیروی عمودی کل نسبت به عمق نفوذ ..... ۶۳

شکل ۳-۱۴ منحنی‌های دینامیکی مکانیزم لنگ- لغزنده در یک سیکل کامل و با دور ثابت میل لنگ $RPM$ ۵۰۰۰: (ـــ) با اعمال اثر فشردگی در فیلم روغن در مفصل غیرایده‌آل (--) با مفصل ایده‌آل الف) منحنی تغییرات شتاب لغزنده نسبت به زمان ب) منحنی تغییرات سرعت لغزنده نسبت به زمان ج) منحنی تغییرات سرعت نسبت به موقعیت لغزنده د) منحنی تغییرات گشتاور خارجی وارد بر میل‌لنگ ..... ۶۵

شکل ۳-۱۵ الف) مسیر حرکت مرکز ژورنال نسبت به مرکز یاتاقان در دایره‌ای به شعاع لقی $c=۰/۱\ mm$ برای مفصل غیرایده‌آل با در نظر گرفتن اثر فشردگی فیلم روغن ب) منحنی تغییرات عمق نفوذ، $\delta$، نسبت به زمان در یک سیکل کامل ..... ۶۵

شکل پ-۱ مکانیزم لنگ- لغزنده با مفصل ایده‌آل ..... ۷۱

شکل پ-۲ ترسیمه آزاد اجزای مکانیزم لنگ- لغزنده با مفصل‌های ایده‌آل ..... ۷۳

# فهرست جداول

جدول ۲-۱ عناصر ماتریس ژاکوبی برای قیدها لولایی و کشویی [۳] ..... ۱۵
جدول ۲-۲ بردار $\gamma$ برای مفصل لولایی و کشویی [۳] ..... ۱۶

جدول ۳-۱ پارامترهای دینامیکی و هندسی مکانیزم لنگ- لغزنده ..... ۴۳
جدول ۳-۲ مشخصات مفصل غیرایده‌آل دارای لقی ..... ۵۲
جدول ۳-۳ مشخصات مفصل غیرایده‌آل برای اعمال نیروی اصطکاک *Ambrosio* ..... ۵۶

# فصل اول: مقدمه و پیشینه پژوهش

## ۱–۱– مقدمه

امروزه کاربرد کامپیوتر در حل مسائل مهندسی بسیار گسترش یافته است. تحلیل سیستم‌های دینامیکی متشکل از اجزای مختلف همواره از جنبه‌های گوناگون و با مدل‌های ساده یا در صورت نیاز با مدل‌های بسیار پیچیده صورت می‌گیرد. تحلیل سینماتیکی و دینامیکی مکانیزم‌های ساده و معمولی غالباً به صورت دستی و با روش‌های معمول و کلاسیک امکان‌پذیر است. ولی با پیچیده‌تر شدن مکانیزم و بیشتر شدن اجزای آن حل معادلات حرکت برای مکانیزم‌ها نیز با دشواری روبه‌روست که در این موارد استفاده از کامپیوتر کمک شایانی در استخراج نتایج با دقت و سرعت بیشتر می‌کند. اما علاوه بر مکانیزم‌های پیچیده، فرضیات دقیق‌تر و منطبق بر واقعیت یک مسأله، می‌تواند موجب پیچیدگی بیش از حد یک مکانیزم ساده گردد. حل معادلات مربوط به چنین مکانیزمی در برخی موارد چنان پیچیده است که گرفتن نتایج با روش‌های معمول و متعارف امکان‌پذیر نیست. در این موارد استفاده از روش‌های مبتنی بر کامپیوتر می‌تواند به حل مسائل کمک کرده و نتایجی بسیار دقیق و ارزشمند را بدست دهد. به خصوص اعمال فرضیات خواص غیرایده‌آل که غالباً منجر به ظاهر شدن پدیده‌های غیر خطی می‌گردد، استفاده از روش‌های حل مبتنی بر کامپیوتر را ضروری می‌کند. لذا تا پیش از ورود کامپیوتر و گسترش آن در کاربرد مسائل فنی مهندسی، بسیاری از طراحی‌ها بر پایه‌ی آزمون و خطا صورت می‌گرفت و حتی در مواردی که نتایج قابل قبول حاصل می‌شد، ضمانتی برای بهینه بودن جواب بدست آمده وجود نداشت. حال آنکه در دو دهه‌ی گذشته و پس از گسترش کاربرد کامپیوتر، مسائل بهینه‌سازی نیز اهمیت ویژه‌ای یافته است. به گونه‌ای که غالباً اعمال این روش‌ها بر مسائل گوناگون ضمن بهبود عملکرد مورد انتظار از یک سیستم، باعث صرفه‌جویی‌های زمانی و اقتصادی نیز می‌شود.

پیشرفت سخت‌افزاری و نرم‌افزاری کامپیوترهای امروزی به هرچه بهتر شدن تحلیل‌ها و استفاده از مدل‌های دقیق‌تر کمک می‌کند. همچنین می‌توان به کمک کامپیوترهای پرسرعت تحلیل‌های همزمان جهت پردازش داده‌های ثبت شده در هر لحظه برای شناسایی و کنترل رفتار دینامیکی یک مدل تجربی انجام داد.

برای نمونه در این شرایط می‌توان رفتار دینامیکی یک مکانیزم چند عضوی با اعضای انعطاف‌پذیر[1] را مدل‌سازی کرده و معادلات آن را در حوزه زمان حل کرد.

عضوهای مختلف یک مکانیزم با انواع اتصالات به هم مربوط می‌شوند. اتصالات به عنوان قیدهای هندسی، حرکت عضوها را محدود می‌کنند تا ارتباط مورد نظر در بین ورودی و خروجی یک مکانیزم برقرار شود. محدودیت حرکت در قیدها با اندرکنش بین عضوهای مختلف توسط نیروهای عمل و عکس‌العمل در اتصالات انجام می‌شود. در حالت ایده‌آل با صلب در نظر گرفتن مواد و انطباق کامل هندسی بین اجزا، محدودیت‌ها را می‌توان به راحتی اعمال کرد. اما در عمل بسیاری از پارامترها و پدیده‌های فیزیکی وجود دارد که خلاف این فرض است و موجب می‌شود که محدودیت مورد نظر در یک مفصل به طور دقیق اعمال نگردد. این پدیده‌ها که غالباً ناشی از خواص الاستیک و پلاستیک اجزای مکانیزم، اصطکاک و تلفات انرژی مکانیکی، خواص هیدرودینامیکی، عیوب مواد، لقی بین قطعات در اتصالات برای انواع انطباقات هندسی و ... هستند، هر یک می‌تواند به طور جداگانه مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد و پس از شناختن ماهیت پدیده و استخراج فرضیات و مدل‌های واقع‌بینانه برای هر یک از این پدیده‌ها، آنها را در مدل کل مکانیزم نیز اعمال کرده و به تحلیل دینامیکی و سینماتیکی مکانیزم پرداخت و نتایج را با سایر حالت‌ها مقایسه نمود. اگرچه در برخی موارد مدل‌های بدست آمده برای توصیف این پدیده‌ها به پیچیدگی زیاد مسأله می‌انجامد، اما اعمال این فرضیات متناسب با کاربرد، اهمیت و دقت مورد نیاز اجتناب ناپذیر است.

[1] *Flexible Multi-body systems*

## ۱-۲- پیشینه پژوهش

کاربرد گسترده مکانیزم‌ها در صنایع ابتدایی و پیشرفته باعث توجه ویژه محققین و مهندسان برای طراحی و بهبود مکانیزم‌ها شده است. از این رو بسیاری از روش‌های کلاسیک و مدرن طراحی در انواع مکانیزم‌ها اعمال شده است و تحقیقات بسیار گسترده‌ای در این زمینه وجود دارد. امروزه نیز با رشد صنایع پیشرفته مانند فناوری فضایی و ماهواره‌ها، تجهیزات پزشکی و بیو مکانیک، سیستم‌های اندازه‌گیری، خطوط اتوماسیون، خودروسازی و صنایع نیازمند به ایمنی بالا هنوز زمینه زیادی برای پژوهش در زمینه‌ی کاربرد و بهبود عمکرد مکانیزم‌ها وجود دارد.

تحلیل دینامیکی مکانیزم‌ها از زمینه‌های کلاسیک و پر کاربرد مهندسی مکانیک است که تئوری‌های آن به صورت مدون و مفصل در مراجع و پژوهش‌های گذشته ارائه شده است و مثال‌های کاربردی از مدل‌ها و فرمول‌بندی‌های ارائه شده مطرح و مورد بررسی قرار گرفته است [۱ و ۲]. با پیشرفت روش‌های مبتنی بر کامپیوتر، مدل‌سازی‌های مناسب برای تحلیل مکانیزم‌ها به کمک کامپیوتر و برنامه‌ها و زیر برنامه‌های گوناگون ارائه شده است [۳ و ۴]. بر این اساس نرم افزارهای تجاری نیز برای تحلیل مکانیزم‌ها تهیه شده است که بر اساس قوانین و اصول دینامیکی طراحی شده‌اند. به کار بردن این نرم‌افزارها نیازمند آشنایی با اصول کار نرم‌افزار و شناختن ماهیت مسأله مورد تحلیل است تا به پاسخ قابل قبول منجر شود لذا اصول کاربرد هر نرم‌افزار نیز برای تحلیل مسائل بیان می‌گردد [۵].

اما علاوه بر مدل‌سازی‌های انجام شده در حل سیستم‌های مکانیکی، بسیاری از آنها منجر به دستیابی به دستگاه‌های معادلات پیچیده می‌گردد که ممکن است به راحتی قابل حل نباشد. لذا روش‌های عددی برای یافتن پاسخ به کار می‌رود. از آنجایی که مسائل دینامیک غالباً منجر به حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات نسبت به زمان می‌شوند که شرایط اولیه آنها معلوم است، روش‌های گوناگون نیز برای حل این دسته از معادلات که به عنوان معادلات دیفرانسیل مقدار اولیه معرفی می‌شوند ارائه شده است [۶]. در استفاده از روش‌های عددی، ممکن است حل معادلات به جواب درست همگرا نشود و با افزودن گام در حل معادلات، جواب‌ها واگرا شوند. این امر ممکن است ناشی از محدودیت‌های روش عددی مورد استفاده در مسأله باشد،

یا اینکه خطاها در همگرایی اثر بگذارد. بر این اساس روش‌هایی برای همگرایی معادلات دینامیکی ارائه شده است که از قیدهای اضافی در حل معادلات استفاده می‌کند[۷]. استفاده از این روش به خصوص در مسائل دینامیکی که شامل برخورد هستند، به استخراج جواب‌های بهتر کمک می‌کند.

برخی ویژگی‌های سیستم‌های مکانیکی واقعی باعث می‌شود که رفتار آنها در عمل کمی متفاوت با آنچه از نتایج مدل‌سازی انتظار می‌رود، باشد. زیرا در مدل‌سازی و تحلیل مکانیزم‌ها و سیستم‌های مکانیکی غالباً برخی فرضیات در نظر گرفته می‌شود که متفاوت با طبیعت واقعی سیستم است و همین موضوع ممکن است در رفتار سیستم اثرات کم یا قابل توجه بگذارد. به عنوان نمونه در تحلیل بسیاری از سیستم‌های دینامیکی اجزای سیستم به صورت صلب در نظر گرفته می‌شود. در حالی که عملاً این فرض در مورد هیچ ماده‌ای صحیح نیست. ولی متناسب با دقت مورد نیاز از یک مکانیزم ممکن است این موضوع نادیده گرفته شود و خللی هم در عملکرد مکانیزم ایجاد نشود. اتصالات غیر ایده‌آل نیز می‌تواند در عملکرد و خروجی مکانیزم اثرگذار باشد. منظور از اتصالات غیر ایده‌آل، مفصل‌هایی است که پدیده‌هایی مانند اصطکاک، لقی، تلفات انرژی، پدیده‌های هیدرودینامیکی و ... در آنها وجود دارد و در عملکرد مکانیزم تأثیر می‌گذارد. هر یک از این پدیده‌ها نیز می‌تواند در مدل‌سازی لحاظ شود و رفتار دینامیکی سیستم در این حالت بررسی شود. بر خلاف آنچه در مورد تحلیل مکانیزم‌های ایده‌آل وجود دارد، حل این سیستم‌ها مستقل از روش حل، به معادلات یکسانی منتج می‌گردد که پاسخ یکسانی برای سیستم پیش‌بینی می‌کند. در حالی که در مورد پدیده‌های غیر ایده‌آل معمولاً مدل‌ها بر اساس پیشنهاداتی است که با اعمال فرضیات مختلف صورت گرفته است و لذا معادلات متفاوتی ممکن است برای تحلیل رفتار یک سیستم ارائه شوند و هر یک توصیف متفاوتی از رفتار سیستم ارائه دهند.

در مفصل‌های مکانیزم همیشه مقداری لقی بین اجزای آن وجود دارد تا حرکت نسبی اجزا در محل اتصال تأمین گردد. در نظر گرفتن لقی باعث می‌شود بر تعداد درجات آزادی سیستم افزوده شود. زیرا قید سینماتیکی و هندسی بین اجزای مکانیزم دیگر برقرار نیست و به جای آن باید نیروهای عمل و عکس‌العمل را بین اجزا در نظر گرفت. تحلیل مکانیزم با در نظر گرفتن لقی در مفصل منجر به تحلیل برخورد بین اجزای

مربوط به مفصل می‌گردد. لذا برای مدل‌سازی چنین مکانیزمی نیاز به شناخت ماهیت پدیده‌ی برخورد می‌باشد. نیروهای بین اجزای مفصل دارای لقی در زمان برخورد باعث تغییر شکل اعضا می‌شود. این تغییر شکل ناشی از خاصیت الاستیک مواد است که باعث می‌شود ماده مانند یک فنر عمل کند و انرژی جنبشی را در خود ذخیره کند و باعث تغییرات ممنتوم در جسم گردد. در پژوهش‌های ابتدایی که بر روی خواص الاستیک اجسام انجام شد، رابطه‌ی بین نیروی الاستیک و تغییر شکل ماده مورد بررسی قرار گرفت. در مدل ارائه شده توسط *Hertz* [۸] رابطه‌ی بین تغییر شکل و نیرو مانند یک فنر غیرخطی در نظر گرفته شد که ضریب فنریت معادل از روی هندسه و ویژگی‌های الاستیک مواد در برخورد تعیین می‌گردد. بدین منظور برخی روابط تحلیلی نیز برای بعضی از اشکال هندسی مانند تماس دو کره ارائه شد. با در نظر گرفتن تئوری الاستیسیته و مبنا قرار دادن مدل *Hertz*، برخی روابط تحلیلی برای برخورد دو استوانه نیز ارائه شد. *Goldsmith* [۹] برای بیان نیروی الاستیک بین دو استوانه که می‌تواند در تحلیل یاتاقان و ژورنال مورد استفاده قرار گیرد، رابطه‌ای پیشنهاد کرد که در آن عمق نفوذ به صورت تابعی غیرخطی و نسبتاً پیچیده از نیروی الاستیک بیان شده است. این مدل بعدها توسط *Dubowsky* و *Freudenstein* [۱۰] تصحیح شد و بعد در تحلیل دینامیکی سیستم مکانیکی با اعضای انعطاف پذیر برای استخراج پاسخ سیستم مورد استفاده قرار گرفت [۱۱]. *Khulief* و *Shabana* [۱۲] با در نظر گرفتن مدل فنر و دمپر خطی برای توصیف نیروهای الاستیک بین دو جسم در تماس سطحی با همدیگر، مدل پیوسته برای نیروهای عمل و عکس‌العمل در مفصل ارائه دادند و به کمک آن رفتار دینامیکی مکانیزم با اعضای انعطاف‌پذیر را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این پژوهش با در نظر گرفتن تلفات هیسترزیس اتلاف انرژی را نیز در پدیده‌ی برخورد وارد کردند و انتقال ممنتوم را با اعمال ضریب بازگشت در برخورد مطالعه کردند. *Lankarani* و *Nikravesh* [۱۳] مدل غیرخطی ارائه شده برای برخورد دو کره توسط *Hertz* را در نظر گرفتند و با افزودن جمله‌ی مربوط به دمپر خطی، مدلی ارائه کردند که می‌توانست استهلاک را در مفصل اعمال کند و در تحلیل دینامیکی نتایج واقع‌بینانه‌تری بدست دهد. آنها در این مدل با استفاده از روابط انرژی ضریب استهلاک خطی را به صورت تابع غیرخطی از عمق نفوذ ارائه کردند. *Ravn* [۱۴] در پژوهش خود، مدل غیرخطی ارائه شده توسط

*Lankarani* و *Nikravesh* را برای تحلیل مکانیزم صفحه‌ای دارای لقی در مفصل لولایی[1] به کار برد. وی نتایج تجربی را برای آونگ دوگانه استخراج کرد و با نتایج تحلیلی مدل خود مقایسه نمود. همچنین با در نظر گرفتن لقی در محل اتصال شاتون به پیستون در مکانیزم لنگ- لغزنده، وقوع رفتار آشوبناک در مفصل را مورد مطالعه قرار داد و نتایج را برای سه لقی مختلف ارائه کرد. در پژوهش دیگری *Flores* [۱۵] با بررسی مدل‌های پیشنهاد شده برای لقی و اصطکاک خشک، تحلیل دینامیکی مکانیزم لنگ- لغزنده با لقی در مفصل گژن‌پین را انجام داد و رفتار دینامیکی مفصل را در مدل‌های مختلف با هم مقایسه کرد. *Ciavarella* و *Decuzzi* [۱۶و۱۷] با استفاده از تئوری پرسون[2] و مدل کردن اتصال لولایی با یک سوراخ و پین به طول نامحدود و صرف‌نظر کردن از اصطکاک، با نوشتن روابط هندسی معادله‌ای کاملاً غیرخطی برای ارتباط بین نیروی الاستیک و عمق نفوذ ارائه دادند. *Liu* و همکارانش [۱۸] نیز با در نظر گرفتن توزیع بیضوی فشار در سطح تماس یاتاقان و ژورنال دارای لقی و به کمک مدل بستر الاستیک[3] عمق نفوذ را به صورت تابع غیرخطی از نیروی الاستیک بیان کردند. آنها نتایج مدل جدید را به همراه نتایج بدست آمده از مدل هرتز و مدل پرسون برای یاتاقان و ژورنال با نتایج شبیه‌سازی المان محدود همان مسأله مقایسه کردند و نشان دادند که مدل هرتز تنها در لقی نسبی زیاد و بار کم نتایج قابل قبول ارائه می‌دهد و مدل پرسون به ازای لقی نسبی کم نتایج نزدیک به حل المان محدود را نشان می‌دهد. حال آنکه مدل جدید ارائه شده توسط ایشان می‌تواند به ازای لقی نسبی کم و زیاد نتایج خوبی را در مقایسه با مدل المان محدود ارائه کند.

اثر دیگری که در یک مفصل غیر ایده‌آل مورد توجه قرار می‌گیرد و باعث ایجاد نیرو بین اجزا و نهایتاً انتقال مومنتم می‌گردد، اصطکاک بین اجزا است. اصطکاک بین دو جسم به پارمترهای مختلفی از قبیل ویژگی‌های ماده، دما، ویژگی‌های سطح، سرعت لغزش و... بستگی دارد. علی‌رغم پژوهش‌های فراوانی که در این زمینه صورت گرفته است، هنوز مدل ساده‌ای که بتواند به خوبی جهت و مقدار نیروی اصطکاک را در مسائل برخورد بیان کند، وجود ندارد. پیچیدگی نیروی اصطکاک ناشی از دو فاز مختلف در حالت لغزش و

[1] *Revolute Joint*
[2] *Persson's theory*
[3] *Elastic foundation model*

ایستا است. در تحلیل‌های دینامیکی غالباً بخاطر پیچیدگی چنین مدلی از فاز ایستا در اصطکاک موجود در دو سطح در تماس با هم صرف‌نظر شده است و نیروی اصطکاک فقط از روی سرعت لغزش نسبی بین دو سطح تعیین می‌گردد. مدل کولمب که نیروی اصطکاک را تنها با ضریبی ثابت به نیروی عمودی مربوط می‌کند در برخی تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹و۲۰]. *Haug* و همکارانش [۲۱] اثر نیروی اصطکاک کولمب را در حالت لغزش نسبی در مفصل لولایی اعمال کردند و به کمک آن برخورد صورت گرفته در مفصل دارای لقی را برای مکانیزم‌های صفحه‌ای و فضایی مدل کردند [۲۲و۲۳]. در مدل مورد استفاده بر اساس اصطکاک کولمب نیروی اصطکاک در لحظه تغییر جهت سرعت نسبی لغزش دو سطح به صورت ناپیوسته در نظر گرفته می‌شود. این امر باعث خطا در حل عددی معادلات می‌گردد و انتگرال‌گیری از نیرو را در حل معادلات دیفرانسیل با مشکل روبرو می‌کند. *Rooney* و *Deravi* [۲۴] برای حل این مشکل مدل کولمب را با تغییر جزئی به صورت پیوسته و با سه ضابطه در سه ناحیه مختلف تعمیم دادند. *Threlfall* [۲۵] مدل ارائه شده توسط *Rooney* و *Deravi* را با در نظر گرفتن تابع منحنی بجای تابع خطی بهبود داد. اما تغییر جهت نیروی اصطکاک همچنان در بازه کوچک همسایگی صفر می‌توانست موجب بروز اشکال در حل عددی معادلات گردد. لذا *Ambrosio* [۲۶] با صفر در نظر گرفتن نیروی اصطکاک در همسایگی سرعت لغزش نسبی صفر، مدلی ارائه کرد که در حل معادلات سیستم دینامیکی فرکانس بالا با مفصل دارای اصطکاک کارایی بیشتری داشت.

در بسیاری از موارد، در صورت امکان مفصل‌های یک سیستم مکانیکی دائماً روغنکاری می‌شوند. لذا اصطکاک خشک و تماس فلز با فلز در این حالت رخ نمی‌دهد. بلکه به جای آن باید مدل مناسب برای نیروهای هیدرودینامیکی معرفی شود. تحلیل فشار روغن در مفصل لولایی با نوشتن معادلات دیفرانسیل آن صورت گرفته است که به معادله رینولدز مشهور است. با اعمال برخی فرضیات این معادله ساده شده است و حل تحلیلی آن ارائه شده است [۲۷]. این مدل در مفصل‌های غیر ایده‌آل دارای لقی برای تحلیل پاسخ سیستم به کار رفته است. *Flores* [۲۸] در پژوهشی، مفصل دارای لقی را در یک مکانیزم صفحه‌ای در نظر گرفت و نتایج بدست آمده از مدل لقی خشک را با نتایج مدل مفصل روغنکاری مقایسه کرد. همچنین حالت

گذر از فاز حرکت در فیلم روغن و فاز تماس فلز با فلز در یک مکانیزم خاص را بررسی کرد و همچنین نشان داد که رفتار دینامیکی مکانیزمی که مفصل آن روغنکاری می‌شود بسیار نزدیک به رفتار دینامیکی مکانیزم با مفصل ایده‌آل است [۲۹].

روغنکاری مفصل علاوه بر تأثیر بر رفتار دینامیکی کل مکانیزم، باعث کاهش سر و صدا و خوردگی و سایش در مفصل می‌شود. بر اساس مدل‌های ارائه شده می‌توان تأثیر پدیده‌های مورد بحث شامل لقی، اصطکاک و روغنکاری را در سایش قطعات بررسی کرد[۳۰]. *Flores* [۳۱] در پژوهشی دیگر با در نظر گرفتن مدل سایش *Archard* و در نظر گرفتن مدل‌های به کار رفته در پژوهش‌های پیشین خود در مورد لقی و اصطکاک اتصالات مکانیزم‌ها، سایش را در مفصل لولایی غیر ایده‌آل بررسی کرد.

## ۱-۳- هدف از پژوهش حاضر

در این پژوهش با در نظر گرفتن مدل‌های ارائه شده برای توصیف رفتار الاستیک و نیروهای موجود در مفصل لولایی غیرایده‌آل، مدل‌های واقع‌بینانه برای توصیف رفتار دینامیکی مکانیزم‌های دارای مفصل غیرایده‌آل انتخاب شده‌اند و نتایج این مدل‌ها بر مکانیزم لنگ- لغزنده با در نظر گرفتن مفصل غیرایده‌آل در اتصال لغزنده به شاتون اعمال شده است. اثرات موجود در مفصل غیرایده‌آل شامل: لقی، اصطکاک، استهلاک سازه‌ای و روغنکاری اعمال شده‌اند. رفتار دینامیکی مکانیزم تحت اثر وجود هر یک از این پدیده‌ها به کمک منحنی‌های مربوط به سرعت و شتاب لغزنده و گشتاور خارجی وارد بر میل‌لنگ مورد بررسی قرار گرفته است و در کنار آن منحنی‌های مربوط به رفتار خود مفصل غیرایده‌آل نیز ارائه شده است.

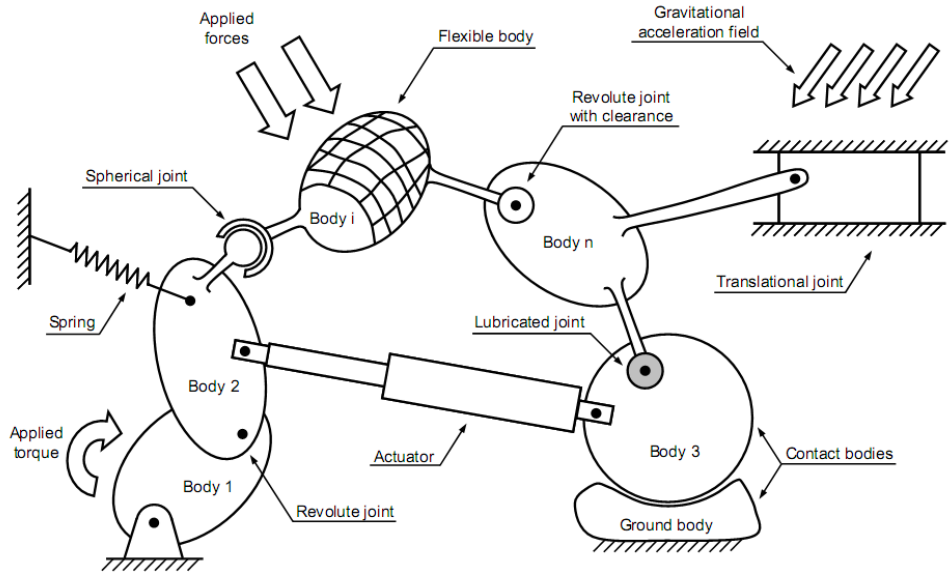
نتایج اعمال پدیده‌های مربوط به مفصل غیرایده‌آل در حالت‌های مختلف، با یکدیگر و با نتایج بدست آمده از حل مکانیزم مشابه با مفصل ایده‌آل مقایسه شده است.

# فصل دوم: پایه‌های نظری

## ۲–۱– مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی چند عضوی

تحلیل دینامیکی سیستم‌های متشکل از عضوهای مرتبط به هم در دهه‌های گذشته مورد توجه قرار گرفته است و روش‌های گوناگونی برای آن اعمال شده است. همچنین برخی نرم‌افزارهای تجاری نیز برای انجام این تحلیل‌ها تولید شده است. نرم‌افزارهای مختلف بر اساس روابط استخراج شده از روش‌هایی مانند کار مجازی، قانون نیوتن، اصل ایمپالس مومنتم و ... کار می‌کنند. لذا استفاده از نرم‌افزارها نیز باید با شناخت طبیعت مسأله و قابلیت‌های نرم‌افزار صورت گیرد تا به جواب مناسب منتهی گردد.

برای تحلیل دینامیکی یک مکانیزم متشکل از اجزای مختلف در اولین مرحله باید بتوان معادلات حرکت را به شکل مناسب فرمول‌بندی کرد. شکل ۲-۱ یک سیستم چند عضوی متشکل از عضوهای مختلف را نشان می‌دهد که با اتصالات گوناگون به هم مرتبط هستند و برخی از اجزا نیز تحت اثر نیروی محرک خارجی قرار دارند.




**شکل ۲-۱** مدل شماتیک کلی از یک مکانیزم چند عضوی با انواع اتصالات [۱۵]